

# Detección de embarcaciones en buceo mediante arrays submarinos

**Autor:** Martín Soneira, Abel (Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación).

**Público:** Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación. **Materia:** Procesado de voz y audio. **Idioma:** Español.

**Título:** Detección de embarcaciones en buceo mediante arrays submarinos.

## Resumen

El objetivo de este proyecto consiste en la detección de embarcaciones mediante el uso de arrays submarinos cuando se esté en una situación de buceo recreativo, aunque se podría aplicar a otros escenarios. Para hacer esta detección se hará uso de hidrófonos capaces de percibir el sonido bajo el agua, conociendo la velocidad de propagación en el agua y la posición de los hidrófonos, podremos conocer en qué dirección está la fuente del sonido. La idea de hacer este proyecto viene a raíz de que el cerebro humano no está preparado para percibir sonidos bajo el agua.

**Palabras clave:** Sonido, Hidrofonos, detección, agua, buceo.

**Title:** Boat detection in diving with underwater array.

## Abstract

The aim of this project is to detect boats with the use of underwater arrays when people is in a recreational diving situation, furthermore it could be used in other scenes. This detection will be done with hydrophones that can perceive the sound underwater, knowing the sound speed propagation in water and hydrophones position, we can know the sound seed direction. The idea of this project comes from the human brain non-capacity for listen sounds underwater.

**Keywords:** Sound, hydrophones, detection, water, diving.

Recibido 2017-08-30; Aceptado 2017-09-05; Publicado 2017-09-25; Código PD: 087115

## 1. INTRODUCCIÓN

En este Trabajo de Fin de Grado se aportará un sistema que permita detectar la dirección de una fuente de sonido en el medio acuático.

### 1.1 Antecedentes y Revisión Bibliográfica

Cuando se bucea, nos encontramos dos situaciones que con este proyecto se pretenden evitar: la localización de una embarcación al oírla (puede incluso que no esté a la vista) y la localización de un compañero cuando este es perdido de vista o se le quiere avisar.

Tras estudiar los factores que afectan al sonido en el agua en el capítulo 5 de “El Océano y Sus Recursos III. Las Ciencias del Mar: Oceanografía, Física, Matemática e Ingeniería” de la Biblioteca Digital y con los conocimientos en buceo, será posible conocer su velocidad de propagación en cualquier punto de una inmersión siempre y cuando conozcamos las propiedades del agua en nuestra localización. Esto será vital para calcular la dirección de la fuente de sonido.

Se hará uso de cálculos matemáticos estudiados durante el grado (Descripciones sacadas de Wikipedia) tales como el Diezmado, Correlación, Transformada de Fourier, Campo Lejano y Trigonometría para localización por retardo, y otros adicionales para la comprobación de errores en las medidas tomadas (RMSE). En el caso del Diezmado, la explicación ha sido extraída de “Digital Signal Processing. A computer-based approach” de S. K. Mitra.

Mediante el uso de un array submarino (hidrófonos) fabricado a mano mediante micrófonos, auriculares y silicona, visto en una entrada de “Experimentos Caseros”, se podrá recibir sonidos en el agua perfectamente y posteriormente realizar los cálculos necesarios para identificar la dirección de la fuente.

## 1.2 Objetivos del Proyecto

El objetivo de este proyecto es crear un sistema que permita calcular y mostrar la dirección por donde se acerca un sonido, ya sea un motor (como un barco por ejemplo) o una alarma (para avisar). De ese modo se evitaría la incomodidad de no poder encontrar la fuente de sonido o tener que interrumpir una inmersión por la pérdida de un compañero.

## 1.3 Estructura del Proyecto

En este proyecto estudiaremos como hace el hombre para localizar la dirección de un sonido, qué diferencias hay en que se propague el sonido en el aire o en el agua, como afecta esto a la hora de que escuche el hombre sonidos en el medio acuático y que solución se aporta al problema en cuestión.

Una vez conociendo el origen del problema, explicaré como son los receptores que vamos a utilizar y cálculos necesarios para poder saber la dirección de la fuente. Se mostrara como se construyen los receptores para que puedan captar sonidos en el agua y también que software se usara para realizar los cálculos.

Por último, mostraré los resultados de varias pruebas en agua, incluida una prueba con el motor real de la depuradora la cual se verá que es perfectamente localizable desde cualquier punto de la piscina.

## 2. BASE TEÓRICA

En el apartado de base Teórica se explicara primero el comportamiento del sonido: como lo detecta el hombre, como varía en el agua y las consecuencias que tiene; y el apartado matemático necesario para este proyecto.

### 2.1 Audición Espacial

El ser humano, como el resto de los animales en la naturaleza, percibe el sonido mediante dos oídos situados en la parte más alta del cuerpo. Existen dos factores que hacen que percibamos perfectamente donde está la fuente del sonido, diferencia de un oído a otro y la forma del oído externo. Información sacada de la UAH.

#### 2.1.1 Retardo y desgaste

El cerebro es capaz de saber por qué lado viene el sonido gracias a las diferencias que percibe de las señales de cada oído. Estas diferencias son:

- El **tiempo** que hay de diferencia desde que llega de un oído a otro. El cerebro es capaz de procesar el poco retardo que hay desde que le llega el sonido a un oído hasta que llega al otro y así asociar que al lado que le llegue primero es la dirección donde se encuentra la fuente del sonido. Posteriormente, si el retardo es mayor o menor, el cerebro calcula el ángulo de incidencia de la señal.
- **Desgaste** de la señal de un oído a otro. Una consecuencia de ese tiempo que tarda en llegar la señal de un oído a otro es que ésta se degrada en el camino de alcanzar el segundo oído, en parte por la diferencia de tiempo y también debido a que la cabeza se encuentra entre medias de los oídos en el caso del cuerpo humano. Gracias a esa degradación, el cerebro asocia el lado donde la señal tiene mejor recepción al lado donde se encuentra la fuente.

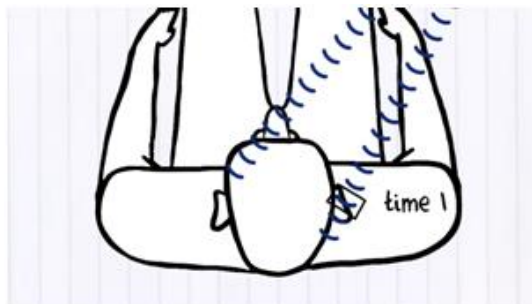


Figura 2.1 El sonido llega antes a un oído que al otro.

### 2.1.2 Oído Externo

El oído humano está dividido en tres partes, externo, medio e interno. A nosotros nos interesa la parte del oído externo que es la que nos permite diferenciar si el sonido nos viene por delante o por detrás, arriba o abajo.



**Figura 2.2 Oído**

Con solo dos oídos, solo es capaz de diferenciar si el sonido viene por un lado u otro, pero no si por delante, atrás, arriba, abajo... Ahí es donde entra el oído externo. Gracias a la forma de la oreja, esta hace que la señal que llega al cerebro se modifique de tal forma que pueda saber en qué dirección viene.

### 2.1.3 Frecuencia/Longitud de Onda

El espectro audible para el oído humano va desde los 20Hz a los 20kHz, aunque esta puede variar según la persona. La frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal están relacionadas con la velocidad de propagación ( $c$ ) de la siguiente forma:

$$f = \frac{c}{\lambda}; (1)$$

Hay que destacar que las bajas frecuencias, al tener una longitud de onda más larga, hacen que sea más difícil para el oído humano el detectar la fuente del sonido. Esto es importante recalcarlo porque la mayoría de los motores suelen tener sonidos graves, haciendo que detectar barcos en el agua por su sonido sea una tarea aún más complicada para las personas.

Los sonidos por encima de 1.000 Hz que tengan una longitud de onda pequeña (inferior a 30 cm), sólo serán escuchados por uno de los dos oídos. Esto se debe a que la cabeza funciona como una pantalla relativa y evita que una parte del sonido alcance al oído que está situado en el lado opuesto a la dirección del sonido. A la diferencia de fase provocada por la diferente distancia se suma así la diferencia de intensidad, amplitud o nivel acústico, para facilitar la localización espacial de la fuente sonora.

Por este motivo, cuando una fuente genera un sonido grave (baja frecuencia, longitud de onda grande), es más complicado detectar la dirección de este, la cabeza no es obstáculo.

Cuando un obstáculo es mucho menor a la longitud de onda resulta prácticamente invisible para el sonido. La longitud de onda del sonido a 10 kHz es poco más de una pulgada (3,4 cm). Los micrófonos de medición más pequeños suelen ser de 1/4 "(6 mm) de diámetro, que prácticamente elimina la direccionalidad.

## 2.2 Acústica Submarina

La velocidad del sonido en nuestra atmósfera, a 20°C, con un 50% de humedad y al nivel del mar es de 343m/s, es la conocida como Match1. El sonido, como toda onda, se produce por la vibración de moléculas, y la energía de propagación del sonido se absorbe en el medio en el que se propaga, variando dicha cantidad de energía en función del medio y las condiciones que nos encontremos. Cuanta más energía se absorba, menos distancia recorrerá la onda y a menos velocidad.

En este caso, estudiaremos como se propaga el sonido en el agua, que es, aproximadamente, 5 veces mayor que en el aire, esto se debe a que en el agua se absorbe menos energía que en el aire, por lo que no hay tantas pérdidas y las ondas pueden viajar más rápido y más lejos. De este modo, podemos percibir cosas cuando estamos en el agua que están tan lejos que no podemos ni verlas, como el motor de un barco, y además, no podríamos distinguir la dirección por la que viene el sonido, ya que nuestros oídos son incapaces de detectar el desfase. Información sacada de "Biblioteca Digital".

### 2.2.1 Factores que afectan a la velocidad de propagación

En el agua existen tres factores principales que afectan a la velocidad del sonido, produciendo grandes diferencias dependiendo si estamos en unas aguas o en otras y su profundidad:

- **Temperatura:** un aumento en la temperatura del medio produce un aumento en la frecuencia con la que se producen las interacciones entre partículas que transportan en el sonido, es decir, aumenta la velocidad con la que se propaga el sonido. Con un aumento de un grado de temperatura, la velocidad aumenta 2.5m/s.
- **Presión:** el aumento de la presión en el agua aumenta la velocidad de propagación del sonido. Este factor varía según la profundidad, a mayor profundidad, mayor presión y, por tanto, mayor velocidad. La velocidad aumenta en orden de 1.8m/s cada 10 bares de presión (10 atmósferas, unos 100 m de profundidad).
- **Salinidad:** como en los casos anteriores, al aumentar la salinidad, aumenta la velocidad del sonido. Por cada 1% de aumento en la salinidad del agua, aumenta un 1.4m/s la velocidad del sonido. Este factor es característico de cada tipo de agua, depende del océano, mar, lago o río en el que nos encontremos. Esta característica es importante porque varía según la temperatura, comúnmente aumentando 0.1 por mil de salinidad por cada grado centígrado y sube también con la presión, ya que crece la densidad del agua.

Destacar que en dos masas de agua podemos tener la misma densidad con distintas combinaciones de temperatura y salinidad. Aquí tenemos una gráfica que muestra cómo se relacionan la salinidad y la temperatura del agua para una misma densidad:

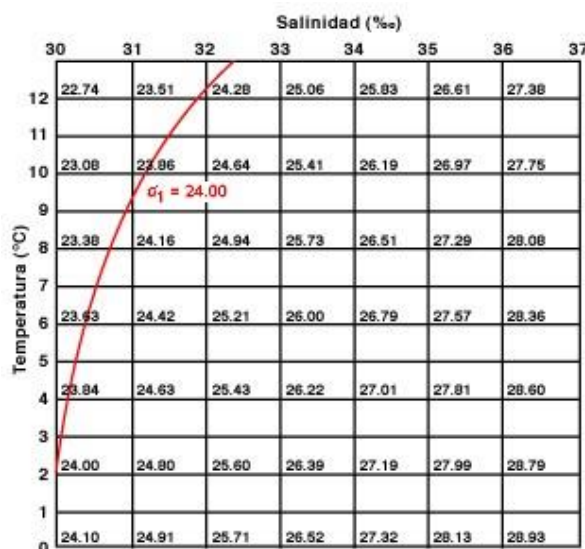
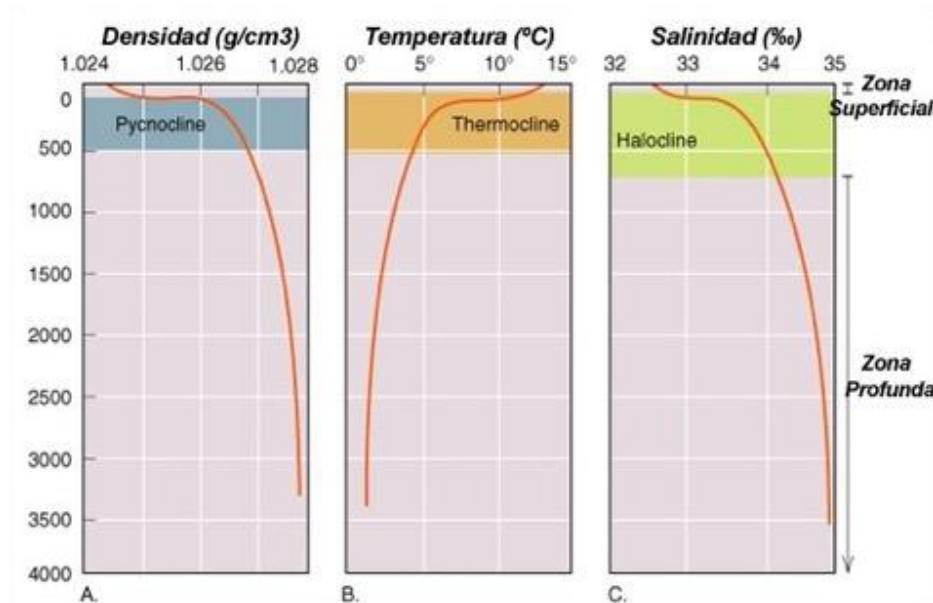


Figura 2.3. Variación de la salinidad con la temperatura

Aquí mostramos de forma aproximada como varían densidad, temperatura y salinidad con la profundidad:



**Figura 2.4: Variación de densidad, temperatura y salinidad con la profundidad.**

### 2.2.2 Profundidad

La profundidad es un factor muy importante a la hora de calcular la velocidad del sonido en el agua, ya que de ella depende de forma directa o indirecta en las características del agua que afectan a la velocidad del sonido.

En el agua, por cada 10 metros de profundidad, aumenta la presión en una atmósfera, aumentando la velocidad del sonido como se ha comentado en el apartado anterior. La temperatura también se ve afectada por la profundidad a la que estemos, ya que cuanto menor sea la profundidad, menos luz habrá y menor será la temperatura del agua y, por consecuencia, disminuirá la salinidad del agua.

Cuando nos encontramos a poca profundidad, hasta 50m, afectará más la salinidad y la temperatura que la presión, siendo esta la zona de buceo recreativo. A partir de esta profundidad, la temperatura empieza a bajar drásticamente, reduciendo mucho la velocidad del sonido, pero contrarrestado por el aumento de presión y salinidad, haciendo el cálculo más complejo aumentando el error hasta 40m.

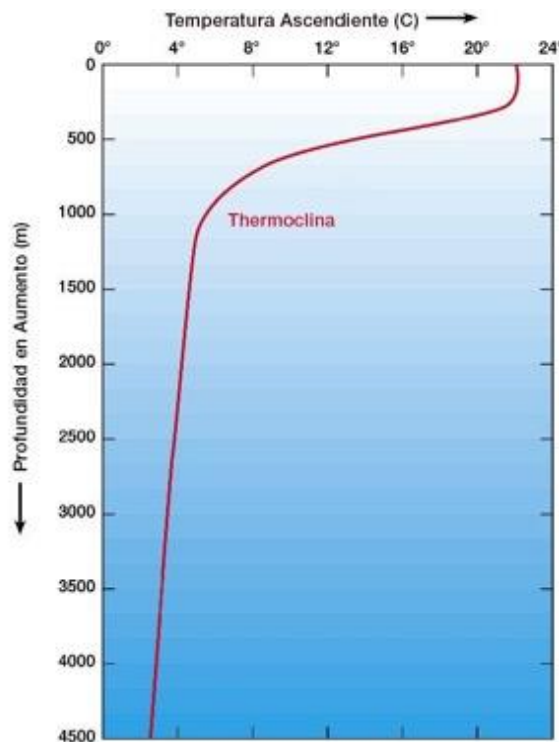
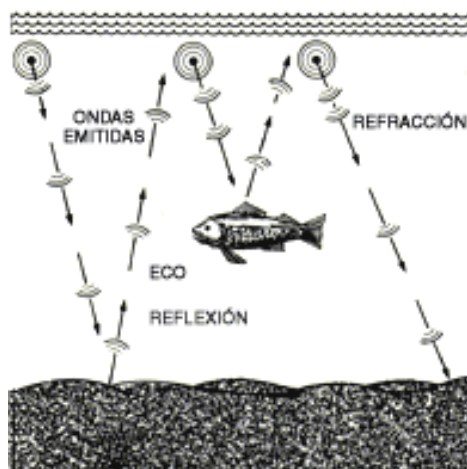


Figura 2.5: Variación de la temperatura con la profundidad.

### 2.2.3 Reflexiones y refracciones

Tanto la superficie como el fondo marino provocan reflexiones de las ondas sonoras, al igual que peces u objetos de gran tamaño. Los estratos del mar también producen estos efectos. Estas reflexiones son usadas para calcular la profundidad del fondo marino o detectar ciertos peces de gran tamaño mediante ultrasonidos. Conociendo como varía la temperatura, presión y salinidad, se puede hacer un cálculo aproximado de la profundidad del fondo marino desde un barco. Se emite una onda sonora y, por el tiempo que tarda en llegar la reflexión, y sabiendo como varían las características del agua, se puede saber la velocidad del sonido y hallar la distancia al fondo.

Este mismo método es el usado por los sónar en submarinos para detectar otros submarinos, haciendo el cálculo más sencillo si ambos objetos se encuentran a la misma profundidad, ya que no cambian las características del agua y la velocidad del sonido es constante.



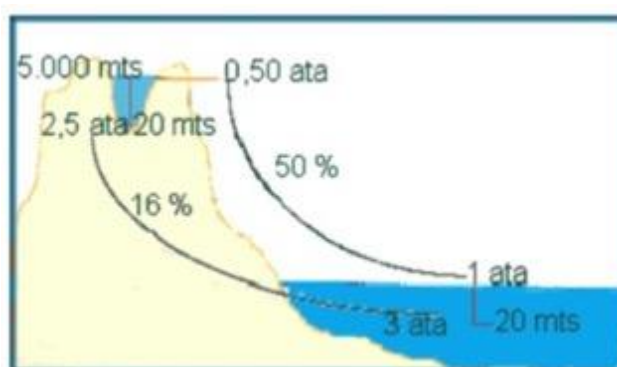
**Figura 2.6:** Las reflexiones pueden ser provocadas por el fondo, la superficie, animales u objetos.

#### 2.2.4 Agua dulce y salada

Es importante diferenciar el agua dulce del agua salada, ya que las características de cada una son muy distintas. Ya solo por la salinidad hay una variación de la velocidad muy grande. Por ejemplo, a 30°C de temperatura, en agua dulce la velocidad del sonido es de 1509.6m/s mientras que en agua salada, con una concentración del 35% de sales, es de 1546.2m/s, casi 50m/s más.

La presión también varía de distinta manera según estemos en unas aguas u otras. La sal hace el agua más densa, por lo que es más pesada y aumentará la presión respecto el agua dulce.

La presión también será menor en agua dulce porque, normalmente, suelen estar por encima del nivel del mar, por lo que la gravedad es menor en un lago que si fuese en mar abierto, ejerciendo menos peso sobre el agua y disminuyendo la presión y la velocidad del sonido. En buceo recreativo, este efecto se tiene en cuenta si se bucea a partir de 700m por encima del nivel del mar, y es conocido como buceo en altitud.



**Figura 2.7.** La gravedad disminuye con la altitud, lo que hace disminuir la presión del agua.



### 2.2.5 Oído humano en el agua

Como hemos visto, el sonido es unas 4.3 veces más rápido en el agua que en el aire, tiene menos degradación en el camino, y además la frecuencia no cambia, esto genera dos condiciones que hacen que el encontrar la fuente del sonido sea prácticamente imposible para el oído humano.

La mayor velocidad hace que el retardo entre oídos sea indetectable para el cerebro, la menor degradación hace que la señal llegue en igual condición a ambos lados, el cerebro no encuentra una señal más intensa que la otra, y como las frecuencias no cambian pero la velocidad si, la longitud de onda aumenta en el mismo rango que la velocidad, unas 4.3 veces mayor que en el aire, por lo que la cabeza no es obstáculo para el sonido en el medio acuático.

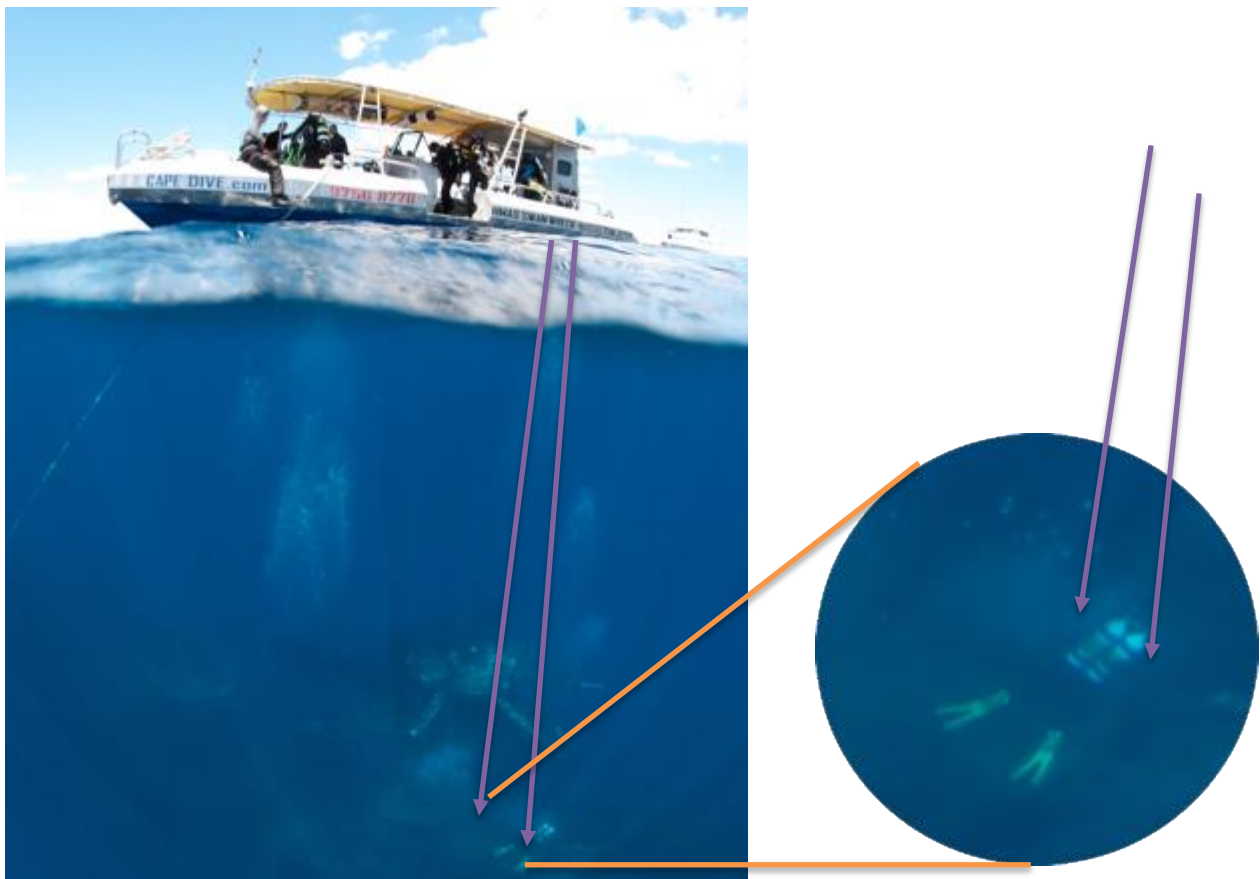
Todo esto provoca que al escuchar un sonido en el agua no podamos diferenciar la dirección por la que viene.

## 2.3 Matemática

En este apartado hablaremos de las propiedades matemáticas utilizadas en este proyecto.

### 2.3.1 Campo Lejano

Uno de los factores a tener en cuenta para este proyecto es que la fuente de sonido va a estar alejada del receptor, encontrándonos así en una situación de Campo Lejano. Como la distancia entre los receptores es mucho menor que la distancia entre emisor y receptor, los caminos que hay hasta un hidrófono y otro será aproximadamente paralelo:



**Figura 2.8: Efecto de Campo Lejano**

Como vemos en la figura 2.8, los rayos que inciden en ambos extremos son casi paralelo. Esto lo podremos aprovechar ya que nos facilitara el cálculo del ángulo de incidencia.



En acústica se denomina **campo lejano** a la región del campo sonoro, en el cual el nivel de presión acústica decrece 6 dB al doblar la distancia a la fuente de sonido.

### 2.3.2 Correlación

Para el cálculo del ángulo nos será necesario conocer el tiempo que hay de diferencia desde que la señal llega al primer hidrófono hasta el segundo. El método usado para calcularlo es hacer una correlación entre las señales que recibe cada uno.

En probabilidad y estadística, la **correlación** indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad (Véase *cum hoc ergo propter hoc*).

La relación entre dos variables cuantitativas queda representada mediante la línea de mejor ajuste, trazada a partir de la nube de puntos. Los principales componentes elementales de una línea de ajuste y, por lo tanto, de una correlación, son la fuerza, el sentido y la forma:

- La **fuerza** extrema según el caso, mide el grado en que la línea representa a la nube de puntos: si la nube es estrecha y alargada, se representa por una línea recta, lo que indica que la relación es *fuerte*; si la nube de puntos tiene una tendencia elíptica o circular, la relación es *débil*.
- El **sentido** mide la variación de los valores de B con respecto a A: si al crecer los valores de A lo hacen los de B, la relación es directa (pendiente positiva); si al crecer los valores de A disminuyen los de B, la relación es inversa (pendiente negativa).
- La **forma** establece el tipo de línea que define el mejor ajuste: la línea recta, la curva monotónica o la curva no monotónica.

Una propiedad que tiene la correlación es que si se hace en el dominio del tiempo, si pasamos las señales al dominio de la frecuencia, la operación equivalente es una multiplicación entre ellas.

Dados los valores muestrales de dos variables aleatorias  $X(x_1, \dots, x_n)$  e  $Y(y_1, \dots, y_n)$ , que pueden ser consideradas como vectores en un espacio a  $n$  dimensiones, pueden construirse los "vectores centrados" como:

$$X(x_1 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x}) \text{ e } Y(y_1 - \bar{y}, \dots, y_n - \bar{y}).$$

El coseno del ángulo  $\alpha$  entre estos vectores es dado por la fórmula siguiente:

$$r = \cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Pues es el coeficiente de correlación muestral de Pearson. El coeficiente de correlación es el coseno entre ambos vectores centrados:

- Si  $r = 1$ , el ángulo  $^\circ$ , ambos vectores son colineales (paralelos).
- Si  $r = 0$ , el ángulo  $^\circ$ , ambos vectores son ortogonales.
- Si  $r = -1$ , el ángulo  $^\circ$ , ambos vectores son colineales de dirección opuesto.

Más generalmente:  $\alpha = \arccos(r)$ .

Por supuesto, desde el punto vista geométrico, no hablamos de *correlación lineal*: el coeficiente de correlación tiene siempre un sentido, cualquiera sea su valor entre -1 y 1. Nos informa de modo preciso, no tanto sobre el grado de dependencia entre las variables, sino sobre su distancia angular en la hipersfera a  $n$  dimensiones.

La Iconografía de las correlaciones es un método de análisis multidimensional que reposa en esta idea. La correlación lineal se da cuando en una nube de puntos se encuentran o se distribuyen alrededor de una recta.

La fórmula de correlación para dos series distintas con cierto desfase " $k$ ", está dada por la fórmula:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (y_{i+k} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=k+1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

La correlación de dos señales nos da como resultado una señal cuyos picos nos indican en que instante las señales se parecen más, por lo que nos valdrá para saber el *lag* o retardo que hay entre ellas.

Información sacada de la UAH y "Wikipedia".

### 2.3.4 Transformada de Fourier

La **transformada de Fourier**, denominada así por Joseph Fourier, es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia, que tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Es reversible, siendo capaz de transformarse en cualquiera de los dominios al otro. El propio término se refiere tanto a la operación de transformación como a la función que produce.

En el caso de una función periódica en el tiempo (por ejemplo, un sonido musical continuo pero no necesariamente sinusoidal), la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamado coeficientes de las series de Fourier. Ellos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

La transformada de Fourier es una aplicación que hace corresponder a una función de valores complejos y definida en la recta, con otra función definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

Donde  $g$ , es decir, tiene que ser una función integrable en el sentido de la integral de Lebesgue. El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal. En la práctica las variables  $y$  suelen estar asociadas a dimensiones como el tiempo —segundos— y frecuencia —hercios— respectivamente, si se utiliza la fórmula alternativa:

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta\xi x} dx$$

La constante  $\beta$  cancela las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.

Sus aplicaciones son muchas, en áreas de la ciencia e ingeniería como la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales (electrónica), la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como

la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir, corresponde al espectro de frecuencias de la señal.

La rama de la matemática que estudia la transformada de Fourier y sus generalizaciones es denominada análisis armónico.

La transformada de Fourier nos será útil ya que nos será más sencillo trabajar en el dominio de la frecuencia que en el tiempo. Información sacada de la UAH y "Wikipedia".

### 2.3.5 Diezmado

El **diezmado** es la operación de reducir la frecuencia de muestreo en un entero,  $M$ . La solución más sencilla es quedarse con una de cada  $M$  muestras. Veremos que esto, en general, provoca problemas de *aliasing* ya que la señal original tiene, potencialmente, un ancho de banda  $M$  veces superior al de la señal diezmada. Para evitar este problema se recurre a un filtrado paso-bajo con una frecuencia de corte adecuada antes de realizar el diezmado propiamente dicho. Como en el caso anterior, el problema se reduce a diseñar un filtro suficientemente bueno.

#### Dominio Temporal

Análogamente el sistema para disminuir la frecuencia de muestreo por un factor  $M$ , siendo  $M$  un entero, genera una secuencia de salida  $y[n]$  con un frecuencia de muestreo que es  $(1/M)$  veces la de la secuencia de entrada  $x[n]$ . La disminución de la frecuencia de muestreo se lleva a cabo tomando una de cada  $M$  muestras y desechando las  $M-1$  muestras intermedias. La relación entrada-salida es:

$$x[n] = x_a(nT) \longrightarrow \downarrow M \longrightarrow y[n] = x_a(nMT)$$

Frecuencia de muestreo de la entrada      Frecuencia de muestreo de la salida

$$F_T = \frac{1}{T} \qquad F'_T = \frac{F_T}{M} = \frac{1}{T'}$$

#### Caracterización temporal del diezmador

La siguiente gráfica muestra el efecto de disminuir la frecuencia de muestreo por un factor 3 en una senoide de frecuencia 0.042Hz muestreada a 1kHz

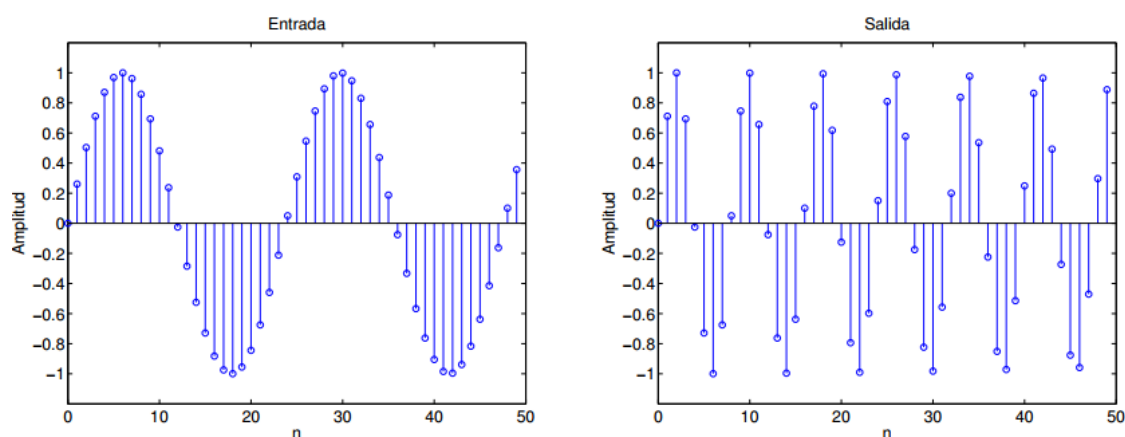


Figura 2.12: Ejemplo de disminución de la frecuencia de muestreo

Ambos sistemas son lineales pero no son invariante temporales; es decir, un retardo de  $n_0$  muestras en la señal de entrada no produce la misma señal de salida retardada  $n_0$  muestras. Veámoslo en el caso del diezmador;  $y(n) = x(nM)$

Su salida  $y_1(n)$  para una entrada retardada  $n_0$  muestras  $x_1[n] = x[M(n - n_0)]$  es sin embargo si calculamos la salida retardada:

$$y[n - n_0] = x[M(n - n_0)] = x[(Mn - Mn_0)] \neq y_1[n]$$

Con lo que el sistema no es invariante temporal.

### Dominio Frecuencial

Vamos a proceder de forma análoga con el diezmador. El procedimiento es ligeramente más complejo.

Si aplicamos la transformada Z sobre la salida del diezmador,  $y[n] = x[Mn]$ , la expresión sería  $Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[Mn]z^{-n}$ , que no podemos relacionar directamente con la transformada Z de la señal de entrada, ya que hay muestras eliminadas. Para obtener esta relación vamos a definir la secuencia auxiliar  $x_{int}(n)$  como:

$$x_{int}[n] = \begin{cases} x[n], & n = 0, \pm M, \pm 2M, \dots \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Es decir, coincide con la secuencia original en los múltiplos de M y en el resto vale 0. El número de términos y posición de valores no nulos coincide con nuestra secuencia por lo que

$$Y(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[Mn]z^{-n} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_{int}[Mn]z^{-n} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_{int}[k]z^{-k/M} = X_{int}(z^{1/M})$$

Tenemos pues, la relación entre la señal diezmada y la secuencia auxiliar. El siguiente paso es relacionar esta secuencia con la original. Para ello podemos expresar  $x_{int}[n]$  como  $x_{int}[n] = c[n] * x[n]$  con  $c[n]$  definida como:

$$c[n] = \begin{cases} 1, & n = 0, \pm M, \pm 2M, \dots \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$c[n]$  está formada por impulsos periódicos repetidos cada M muestras. Una representación equivalente se obtiene expresándolo como la transformada de Fourier inversa de una secuencia de M muestras de valor  $1/M$  cada una de ellas, como indica la expresión siguiente:

$$c[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} W_M^{-kn} \text{ con } W_M = e^{-j2\pi/M}$$

Si calculamos la transformada Z de la secuencia  $x_{int}[n]$

$$X_{int}(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c[n]x[n]z^{-n} = \frac{1}{M} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left( \sum_{k=0}^{M-1} W_M^{-kn} \right) x[n]z^{-n}$$

Intercambiando el orden de los sumatorios

$$X_{int}(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \left( \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]W_M^{-kn} z^{-n} \right) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(zW_M^k)$$

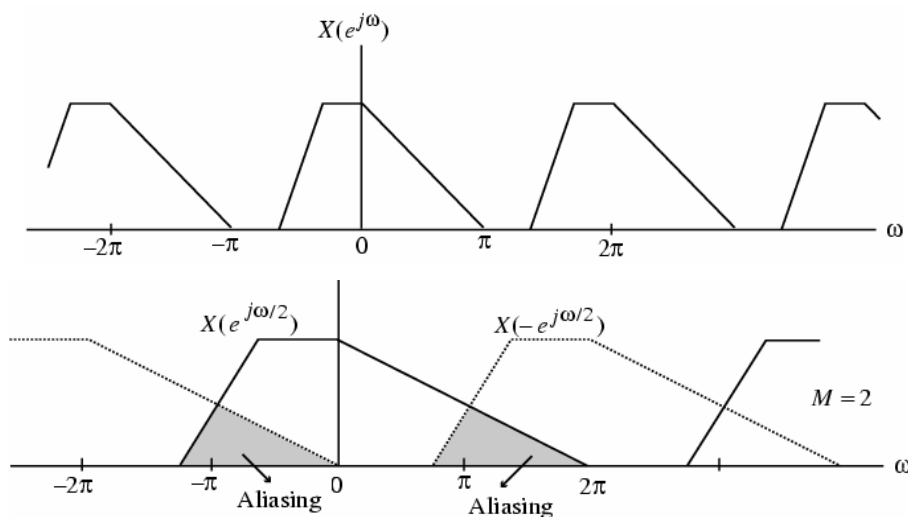
Como  $Y(z) = X_{int}(z^{1/M})$ , la relación entre la señal de entrada y la salida del diezmador es:

$$Y(z) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(z^{1/M} W_M^k)$$

Para interpretar esta expresión veamos que ocurre en el caso particular  $M=2$ . Evaluando la transformada Z sobre la circunferencia unidad tenemos:

$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{2} \{X(e^{j\omega/2}) + X(-e^{j\omega/2})\}$$

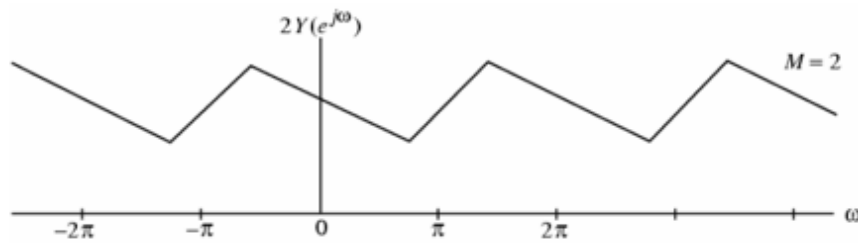
Como  $X(-e^{j\omega/2}) = X(-e^{j(\omega/2 - 2\pi)})$ , el segundo término de la ecuación es el primero desplazado  $2\pi$  hacia la derecha. La siguiente gráfica muestra el resultado de aplicar un diezmado por un factor 2 a la misma señal utilizada para ilustrar la interpolación. El espectro de la señal diezmada se obtiene "estirando" y escalando el espectro de la señal original por un factor 2. En este caso, debido a la periodicidad, este estiramiento ha producido un solapamiento de los espectros; es decir, se produce *aliasing*.



Extraído de: Digital Signal Processing. A computer-based approach. S. K. Mitra.

**Figura 2.13 Efecto de solapamiento espectral producido en un proceso de diezmado**

La respuesta frecuencial total, teniendo en cuenta el solapamiento es la siguiente:



**Figura 2.14: Espectro resultante**

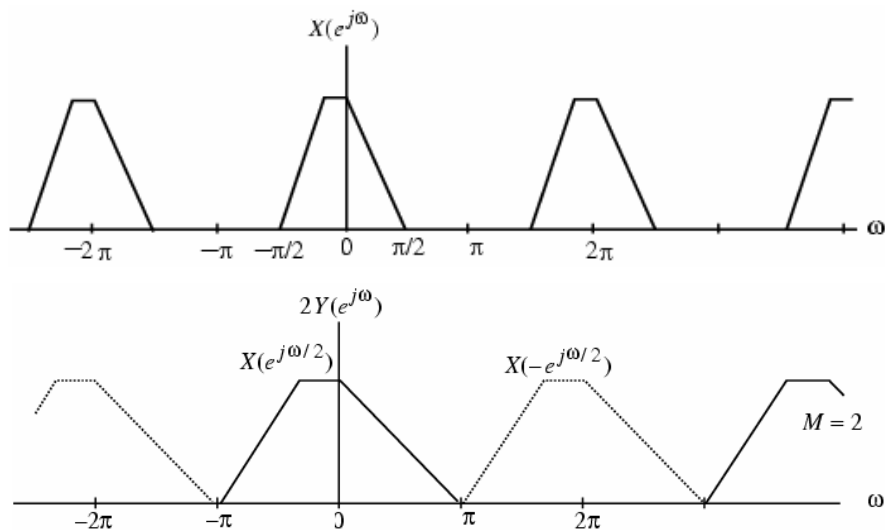
Si la señal  $x(n)$  tuviese un espectro con contribución nula para frecuencia mayores que  $\pi/2$  ( $X(e^{j\omega}) = 0$  para  $|\omega| \geq \pi/2$ ), no se hubiese producido solapamiento de los espectros.

En general para un diezmado por un factor  $M$ , la relación entre las respuestas en frecuencia de la entrada y la salida viene dada por

$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} X(e^{j(\omega - 2\pi k)/M})$$

Es decir, la salida es una suma de espectros de la señal original desplazados uniformemente, “estirados” y escalados por un factor  $1/M$ . Ya que los espectros son “estirados” un factor  $M$ , la condición para que no se produzca *aliasing* es que:

$$X(e^{j\omega}) = 0 \text{ para } |\omega| \geq \pi/M,$$

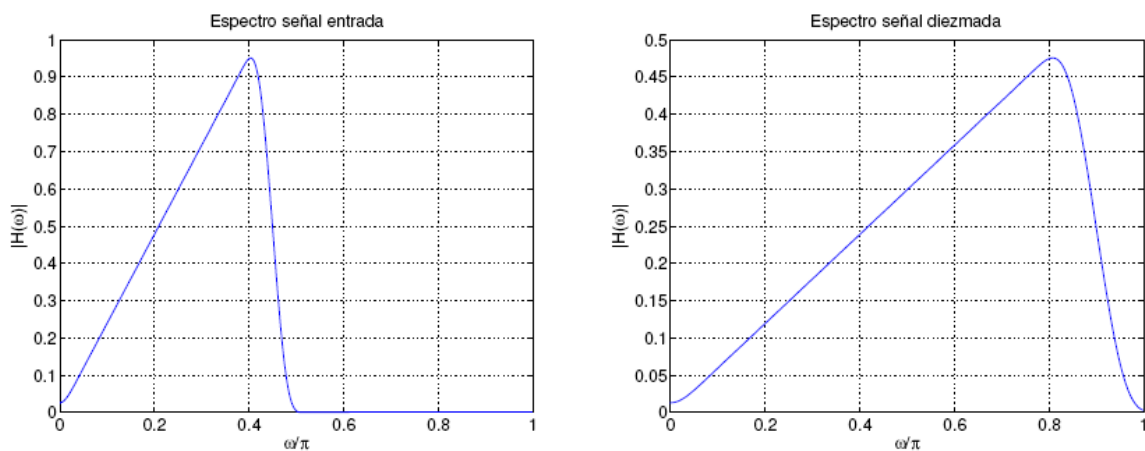


Extraído de: Digital Signal Processing. A computer-based approach. S. K, Mitra.

**Figura 2.15: Espectros de la señal original e interpolada en un proceso en el que no se produce solapamiento**

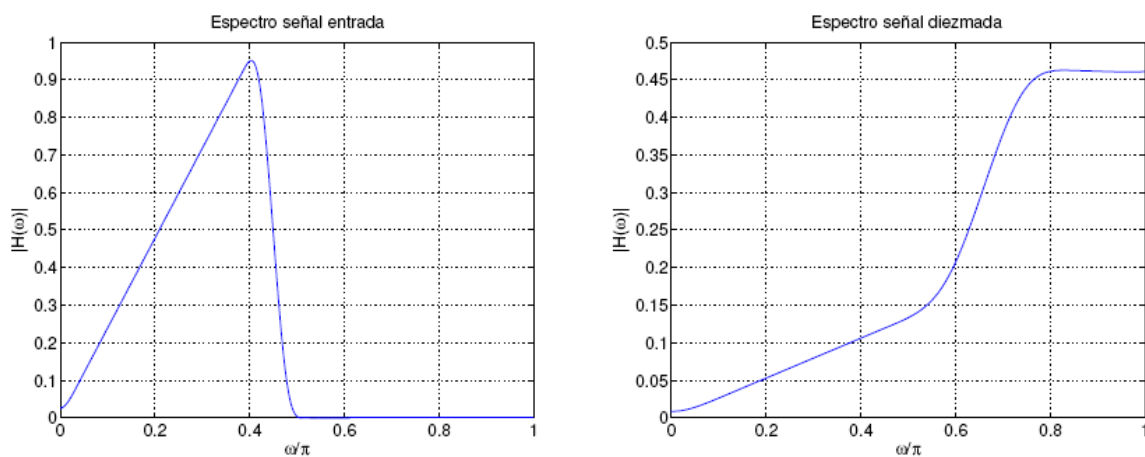
Para el ejemplo anterior ( $M=2$ ) tendríamos:

Consideremos el caso del derivador. Ya que las frecuencias se extienden hasta 0.5 podremos utilizar un factor de diezmado máximo de 2, con el resultado siguiente:



**Figura 2.16: Espectro de un diferenciador y de su versión diezmada por un factor 2**

Si el factor de diezmado fuese 3 obtendríamos un espectro de salida, tal como indica la figura 2.17 en la que se observa claramente el efecto del *aliasing*

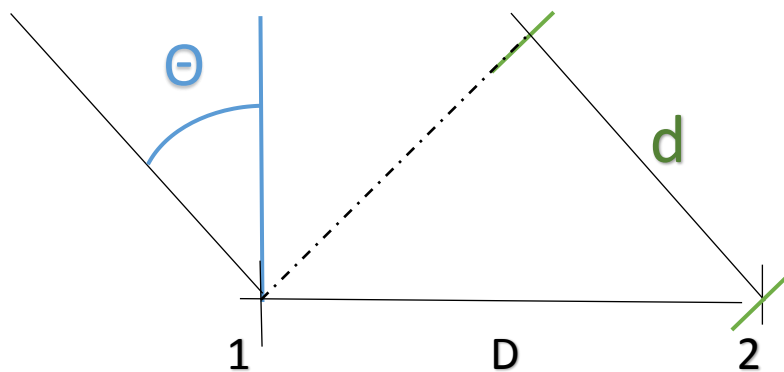


**Figura 2.17:** Espectro de un diferenciador y de su versión diezmada por un factor 3, en la que se aprecia el efecto del solapamiento.

Información sacada de “Digital Signal Processing. A computer-based approach” y UAH.

### 2.3.6 Ángulo de Incidencia

Como la fuente del sonido está lejos respecto a los hidrófonos, puede considerarse que la señal llega con el mismo ángulo a los receptores (Campo Lejano). En la figura 2.18 vemos el sistema a resolver para calcular el ángulo de incidencia:



**Figura 2.18:** Cuando la fuente está muy lejos, los rayos que llegan paralelamente a ambos receptores.

Aplicando trigonometría, nos queda que la ecuación para calcular el ángulo de incidencia es la siguiente:

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{d}{D} \right) \quad (2);$$



Como 'D' es la distancia entre hidrófonos, es un dato que ya conocemos, por lo que de esta ecuación deberemos calcular 'd', que es la distancia extra que recorre la señal al hidrófono más alejado.

Para calcularla, hay dos datos que debemos conocer previamente, la velocidad de propagación y el tiempo extra que tarda la onda en llegar:

$$d = Vs * Tau \text{ (3);}$$

La velocidad de propagación del sonido en el agua la podemos calcular sabiendo como varía según las características del agua:

- +2.5m/s por cada grado centígrado de temperatura.
- +0.18m/s por cada bar de presión.
- +1.4m/s por cada 1% de salinidad.

Como la velocidad del sonido en el agua a 0°C, 1Bar de presión y 0% de salinidad es de 1434.6m/s, usaremos este dato como velocidad de referencia. La ecuación (3) nos quedaría así:

$$Vs = 1434.6 + 2.5 * T + 0.18 * P + 1.4 * S \text{ (4);}$$

Siendo 'T' la temperatura del agua, 'P' la presión y 'S' la salinidad.

TAU será la diferencia de tiempo que tarda la señal en llegar a un hidrófono a otro, lo sabremos mediante la correlación entre las señales recibidas en los hidrófonos. Si TAU nos sale positivo, significara que el sonido llega antes a 2 que a 1 y viceversa.

Ya conocemos los datos necesarios para saber la distancia y el ángulo de incidencia de la señal:

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{Vs * Tau}{D} \right) \text{ (5);}$$

En caso de que TAU sea negativo, la ecuación 5 nos dará igualmente el ángulo negativo. Si es 0, significa que la señal llega por igual a ambos hidrófonos.

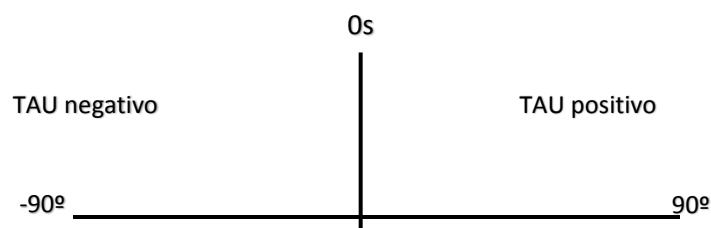
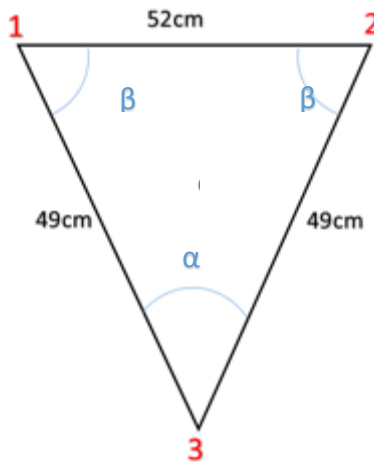


Figura 2.19. Representación de los ángulos según TAU

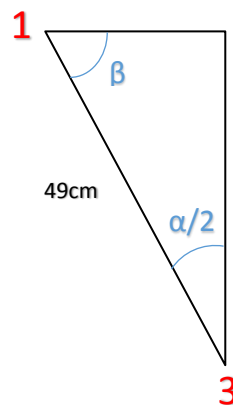
### 2.3.7 Triángulo receptor

Como vamos a tres grabaciones pero con la posición de los hidrófonos varía. En la figura 2.19 vemos la posición de los hidrófonos que utilizaremos:



**Figura 2.20: Posición hidrófonos**

Por trigonometría calculamos los ángulos del triángulo:



**Figura 2.21: Posición hidrófonos**

El ángulo  $\alpha$  sería:

$$\alpha/2 = \text{asin}\left(\frac{26}{49}\right) \rightarrow \alpha = 2 * \text{asin}\left(\frac{26}{49}\right) = 78.74^\circ;$$

Sabiendo  $\alpha$  podemos calcular  $\beta$  fácilmente. Como la suma de los ángulos de un triángulo son  $180^\circ$ :

$$\alpha + 2\beta = 180 \rightarrow \beta = \frac{180 - \alpha}{2} = \frac{180 - 78.74}{2} = 50.64^\circ;$$

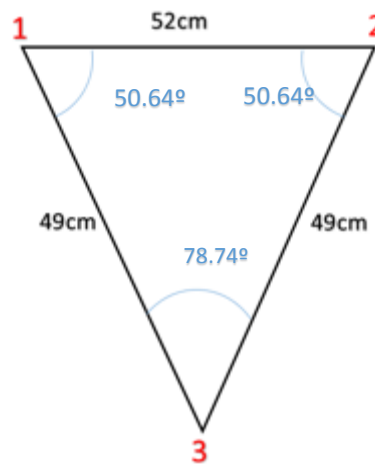


Figura 2.22: Posición hidrófonos

### 2.3.8 Seleccionar ángulo

Un problema que encontramos al calcular el ángulo es que usando solo dos hidrófonos no podemos diferenciar si la fuente del sonido esta delante o detrás de nosotros tal y como se ve en la figura 2.19, es necesario añadir más hidrófonos para poder diferenciar por donde viene.

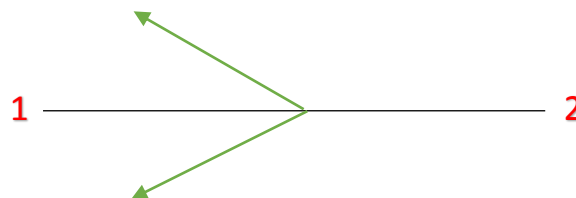


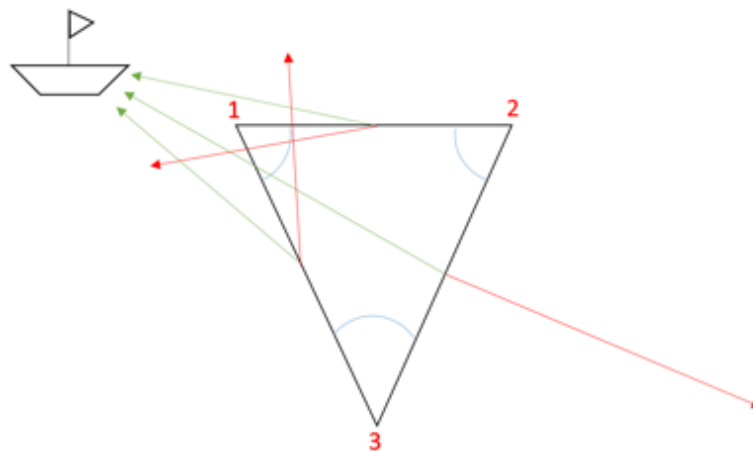
Figura 2.23

**Con dos hidrófonos no diferenciamos si la fuente esta delante o detrás de nosotros.**

El ser humano (y resto de animales) distinguen si la fuente de sonido está por delante o detrás a la forma de la oreja, como se vio en el apartado de Audición Espacial (Pág. 15), pero como nuestros hidrófonos son omnidireccionales, no pueden distinguirlo, pero se soluciona añadiendo un hidrófono más.

Para este sistema se ha escogido usar tres hidrófonos de forma que se pueda detectar el sonido en 360 grados. Formaran un triángulo como se ve en la figura 2.20, y se usaran dos de ellos para saber si el sonido viene por la derecha o por la izquierda, y un tercero para averiguar el ángulo de incidencia.

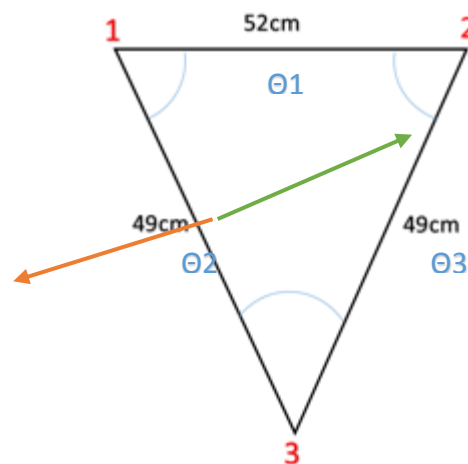
Por cada TAU nos dará dos ángulos, arriba y abajo, por lo que es necesario un tercer hidrófono para diferenciar. De esta manera podemos deducir fácilmente donde está la fuente. En la figura 2.24, en rojo se marca la segunda dirección (cada hidrófono da dos ángulos iguales en cada sentido) que no sería posible.



**Figura 2.24:** Con 3 hidrófonos podemos diferenciar fácilmente la posición de la fuente de ruido.

### 2.3.9 Cálculo del Ángulo

Una vez que conocemos las dimensiones de nuestro triángulo receptor y por qué lado viene, debemos calcular el ángulo desde los tres lados. Usando el lado de arriba como referencia, y llamando  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  a los ángulos de incidencia de los lados 1-2, 1-3 y 2-3 respectivamente. El lado 1-2 nos indicara si la fuente está a la derecha o a la izquierda, ya que por sí solo no es capaz de dar información de si el sonido viene por delante o por detrás. Para los lados 1-2 y 2-3 pasa igual, por lo que diferenciaremos los ángulos que apuntan hacia dentro y fuera del triángulo. Para ello, usaremos verde para dentro, naranja para fuera.



**Figura 2.25:** Ángulos de Incidencia

Por facilidades en el cálculo, se utilizará el siguiente sistema de coordenadas:

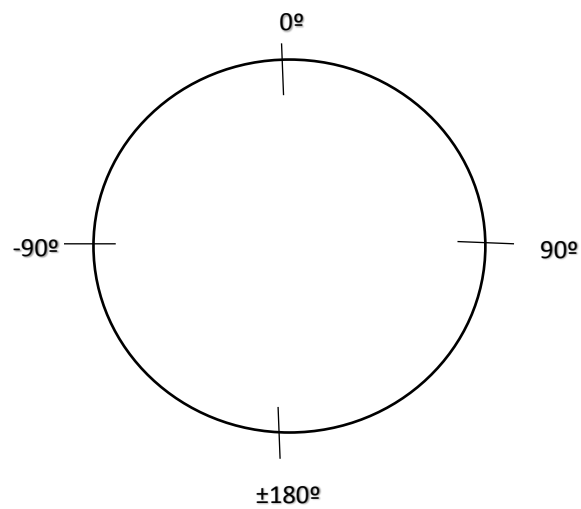


Figura 2.26: Sistema de coordenadas

Si la fuente viene desde la derecha:

- Lado 1-3:  $\beta + \theta_2 = 50.64 + \theta_2$ . (Interior)
- Lado 2-3:  $-\beta - \theta_3 + 180 = 130.64 + \theta_3$ . (Exterior)

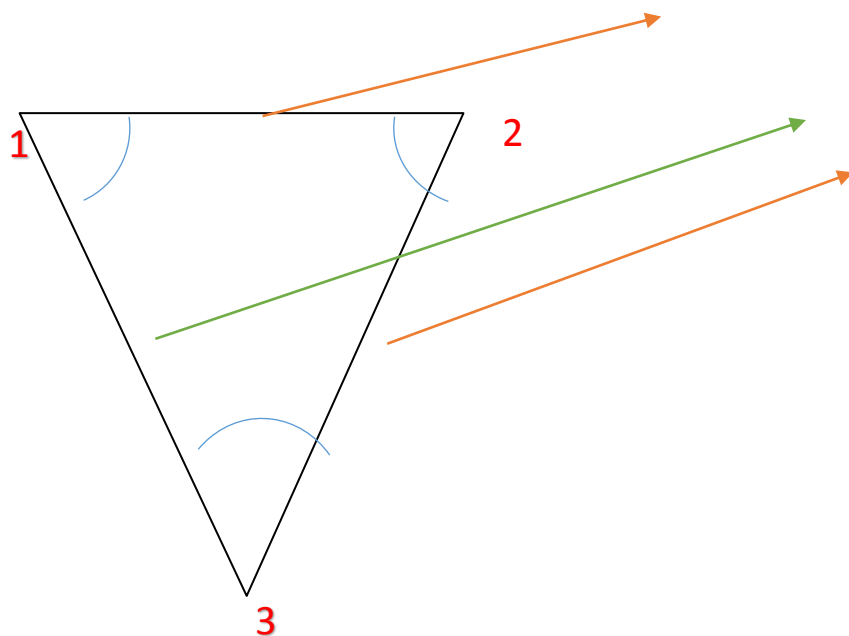
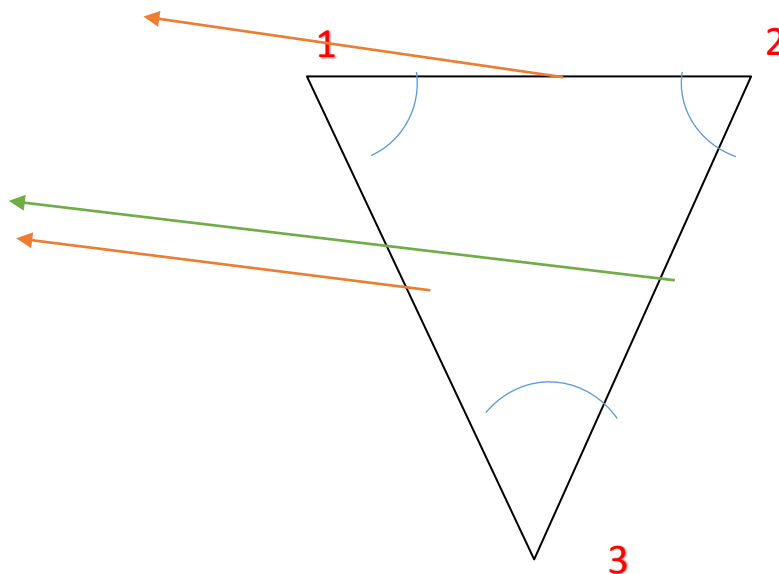


Figura 2.27: Por la derecha

Si la fuente viene desde la izquierda:

- Lado 1-3:  $-\theta_2 - 18 + \beta = -130.64 + \theta_2$ . (Exterior)
- Lado 2-3:  $-\beta + \theta_3 = -50.64 + \theta_3$ . (Interior)



**Figura 2.27: Por la derecha**

Cuando el ángulo calculado por 1-2 es menos de  $\pm 30^\circ$ , puede haber errores al detectar si el sonido viene por arriba o por abajo, se deberán usar los ángulos exteriores de los lados 1-3 y 2-3. Se utilizarán las dos fórmulas de exterior para ver si el sonido viene de abajo, y las de interior para ver si viene por arriba.

- Lado 2-3:  $-\beta - \theta_3 + 180 = 130.64 + \theta_3$ . (Exterior)
- Lado 1-3:  $-\theta_2 - 180 + \beta = -130.64 + \theta_2$ . (Exterior)

O:

- Lado 1-3:  $\beta + \theta_2 = 50.64 + \theta_2$ . (Interior)
- Lado 2-3:  $-\beta + \theta_3 = -50.64 + \theta_3$ . (Interior)

Los que sean más parecidos de ambas combinaciones indicarán el ángulo correcto, la otra combinación dará ángulos muy diferentes (en rojo). La primera combinación indicará que viene por abajo, mientras que la segunda indicará que viene por arriba.

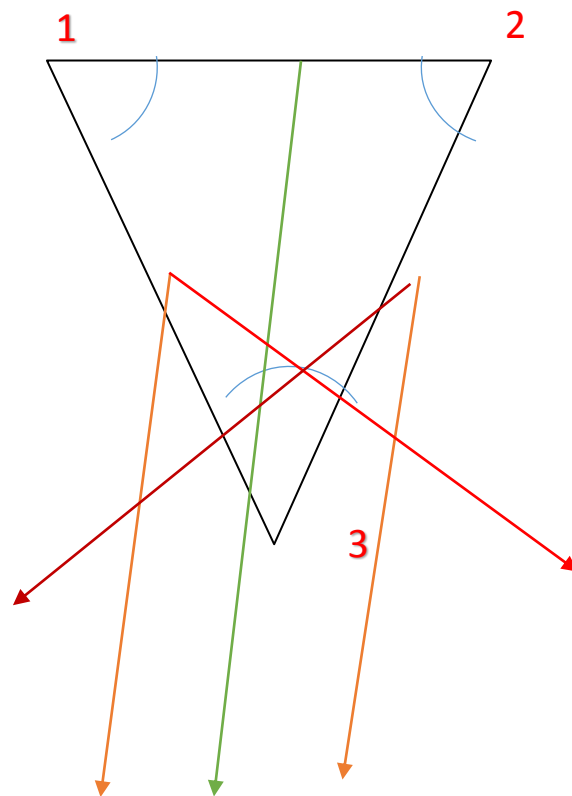


Figura 2.28: Por atrás con menos de  $\pm 30^\circ$  (o  $150^\circ$ )

Los ángulos de incidencias calculados se introducirán en las formulas independientemente si vienen en positivo o negativo.

### 2.3.10 Número de Muestras

Otro dato a tener en cuenta es el número máximo de muestras que nos permite en sistema. Esto dependerá de la distancia entre hidrófonos, la velocidad de propagación y la frecuencia de muestreo. Está relacionado así:

$$\max = D * \frac{f_s}{V_s} \quad (6);$$

Siendo 'D' la distancia entre hidrófonos, 'fs', la frecuencia de muestreo y 'Vs' la velocidad de propagación.

### 2.4 RMSE

Para conocer los errores en los cálculos del ángulo de incidencia, haremos uso del RMSE (Root-Mean-Square- Error). El RMSE o RMSD (Root-Mean-Square Deviation) es usado frecuentemente para medir la diferencia entre valores predichos por un estimador y el valor observado. A estas diferencias se les llama residuos si los cálculos se realizan sobre las muestras que se usaron en la estimación, y errores de predicción cuando se calcula fuera de la muestra.

Para calcularlo, restamos el ángulo real menos el obtenido, elevamos al cuadrado, hacemos la media y la raíz cuadrada. Lo vemos en la ecuación 7, donde  $\sigma$  es el ángulo real y  $\Theta_i$  son los ángulos calculados.



$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma - \theta_1)^2}{n}}; (7)$$

### 3. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

#### 3.1 Hidrófonos

Para la recepción del sonido se hará uso de arrays submarinos o **hidrófonos**, que permitan detectar sonidos bajo el agua. Su construcción esta sacada de la web “Experimentos Caseros”.

Para la fabricación de los hidrófonos se hará uso de unos auriculares, unas capsulas microfónicas como el modelo Panasonic WM-61A, que se pueden comprar por internet o en una tienda de electrónica; y silicona.



Figura 3.1 Capsula microfónica

El primer paso será desmontar los auriculares y desoldar el altavoz, sustituyendo éste por una capsula microfónica. Al hacer esto, tendremos dos micrófonos y podremos grabar en estéreo.

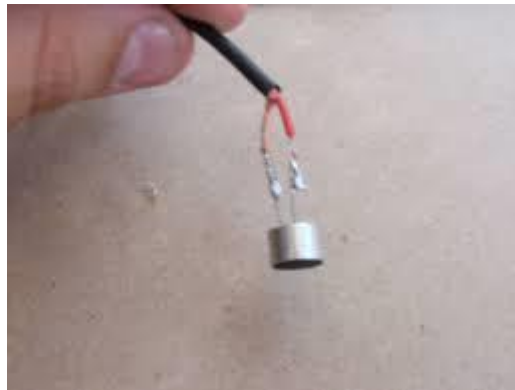


Figura 3.2 Cápsula soldada a cable de auriculares

El segundo paso será rellenar el auricular de silicona y dejando una fina capa de esta en el micrófono, lo suficiente para que sea impermeable pero no demasiado para que el micrófono no pierda sensibilidad.



**Figura 3.3: Hidrófonos**

Como se han utilizado auriculares estéreo, tenemos la ventaja de que podremos grabar el lado izquierdo y el derecho, esto nos será muy útil posteriormente para separar lo recibido por cada uno.

Este proceso se ha realizado dos veces, es decir, tenemos 4 hidrófonos. En este caso se hará uso solo de 3, ya que solo con dos no sería posible identificar si un sonido viene por delante o por detrás, solo sabríamos que la fuente de sonido esta por un lado u otro. El cuarto hidrófono se quedaría desactivado, aunque también podría utilizarse.

### **3.2 Grabadora**

Una tengamos listo nuestros hidrófonos, que podremos captar sonidos en estéreo gracias a la grabadora Olympus LS-100:



**Figura 3.4: OLYMPUS LS-100**

Como esta grabadora detecta lo recibido por dos hidrófonos, necesitaremos usar dos para captar el sonido de los cuatro hidrófonos, aunque el cuarto posteriormente se ignoraría debido al sistema escogido.

### 3.3 Sujeción

El siguiente paso consistirá en fabricar algo que nos permita sujetar los hidrófonos y que no se muevan cuando estemos haciendo pruebas en el agua. Para hacer pruebas se fabricara una T con tubos de PVC y unas pinzas para sujetar los hidrófonos y a la vez que sea posible ponerlos y quitarlos.



**Figura 3.5:** Para sujetar los hidrófonos se usó tubo de PVC y pinzas.

Los tubos se unirán con una T de PVC nuevamente, todo unido con pegamento al igual que las pinzas:



**Figura 3.6:** T usada para colocar los hidrófonos

De esta manera ya tenemos nuestros hidrófonos sujetos para que a la hora de grabar la distancia entre ellos no varié. La distancia entre ellos deberá ser introducida posteriormente en nuestro script de Matlab para el correcto cálculo del ángulo de incidencia.

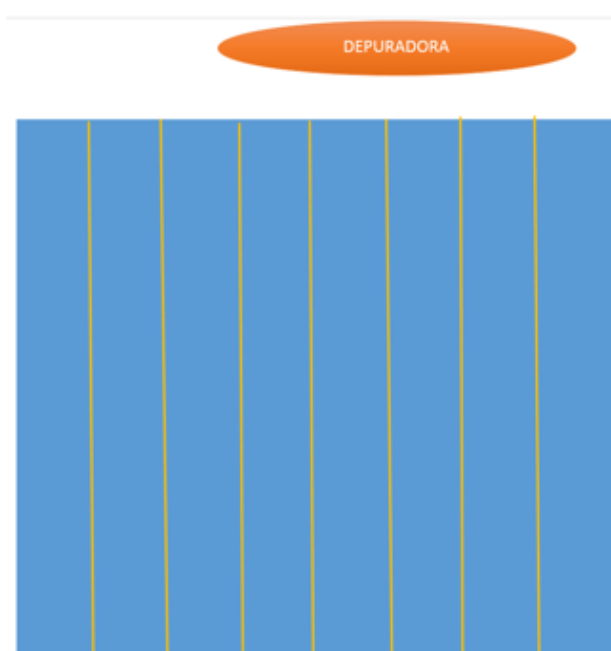
### 3.4 Fuentes de sonido

Para probar la recepción de los hidrófonos se utilizaron varios tipos de sonidos. La fuente de sonido utilizada es un teléfono móvil Bravus BRVAR909. En él se reproducía el sonido de un motor para simular el sonido de una embarcación y también un pitido intermitente a modo de alarma. Se escogió este móvil por tener el estándar IP67 de resistencia al agua y polvo.



**Figura 3.7: Bravus BRVAR909**

Otra fuente de sonido utilizada, aprovechando las pruebas en piscina, fue el sonido del motor de la depuradora, ya que es un sonido que también se parece al sonido de una embarcación y además se escucha desde cualquier punto de la piscina. De ese modo se podía aprovechar mejor la condición de fuente lejana.



**Figura 3.8: Dibujo de la piscina**

### 3.5 Sincronización

Debido a que se utilizan dos grabadoras, es posible que a la hora de ponerlas a grabar haya un pequeño retardo entre ellas. Esto nos perjudica a la hora de calcular los ángulos, ya que no tendríamos un retardo real con el tercer hidrófono.

Para sincronizar ambas grabaciones se hará un sonido breve como un aplauso o pitido que no sirva de referencia. Posteriormente podremos cortar el audio para que el sonido captado por ambas grabadoras estén en sincronizadas.

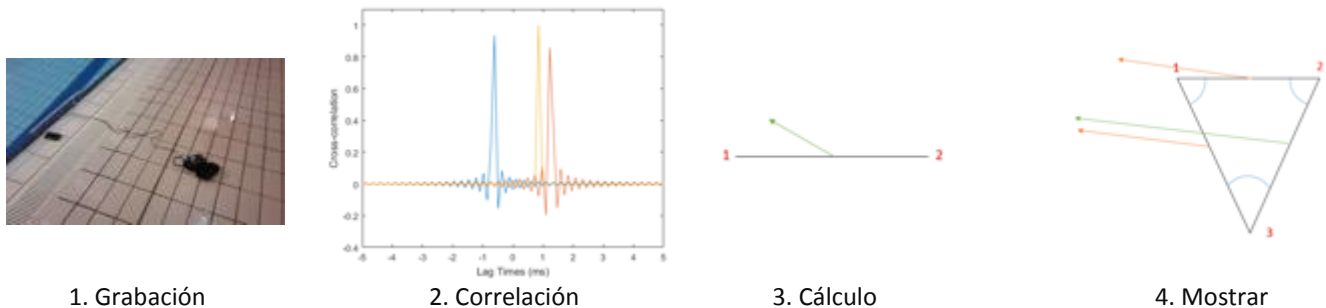
Se realiza una grabación larga donde la fuente de sonido estará en movimiento, pudiendo así probar que el sistema funciona desde cualquier ángulo. Luego con un programa de edición de audio se cortaran fragmentos cortos. Se deberá tener cuidado con la longitud de los archivos de sonido, ya que si no coinciden el script en Matlab nos dará un error y no funcionará.

Como ambas grabadoras capturan sonido en estéreo, una vez introducidas en Matlab habrá que separar los canales. De la grabadora 1 separamos el lado izquierdo y el derecho, de la segunda grabadora nos quedamos solo con la señal captada por el hidrófono utilizado en la grabación, el segundo queda descartado aunque también podría haberse utilizado. En nuestro caso lo descartamos porque puede captar sonidos que nos perjudique a la hora de procesar las señales.

Una vez introducidas las grabaciones de las dos grabadoras, Matlab nos mostrara por pantalla un ángulo por cada dos hidrófonos, es decir, nos sacara 3 ángulos como se explica en el apartado de Planos (Capítulo 6, Pág. 71).

### 3.6. Descripción del Sistema

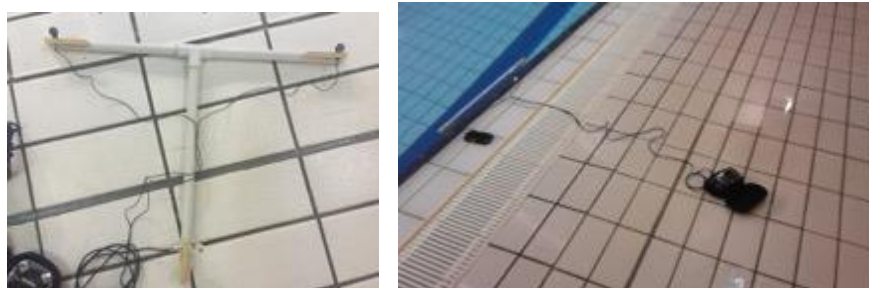
En este apartado explicare el proceso completo desde que se graba un sonido hasta que se muestra el ángulo por pantalla. Para mostrarlo en un diagrama de bloques, el proceso sería el siguiente:



**Figura 3.9: Diagrama de bloques**

#### 3.6.1 Grabación

El primer paso consistirá en grabar el sonido en el agua mediante nuestros hidrófonos, colocados con nuestra T y usando nuestras grabadoras para almacenar el sonido.



**Figura 3.10: Grabación**

Es importante recordar hacer un sonido inicial al principio de la grabación para posteriormente sincronizar lo captado por ambas grabadoras, ya que el mínimo retardo entre ellas perjudicaría a los posteriores cálculos.

En caso de realizar una grabación de larga duración en la que la fuente se mueva respecto al receptor, se recortan trozos pequeños de audio en el mismo instante de las dos grabaciones. Ambas muestras deberán tener exactamente la misma duración para evitar errores en el código de Matlab.

#### 3.6.2 Correlación

Una vez tengamos grabados los sonidos deseados (depuradora, alarma...) se comparará el sonido captado por cada hidrófono. Para el caso de la grabadora 1 que usamos los dos canales (los dos hidrófonos de arriba), habrá que separarlos; y en la grabadora 2 se usará solo la señal captada por el hidrófono en uso (hidrófono de abajo).

Se procederá a hacer la correlación entre ellas para conocer el retardo que hay en los audios captados por cada hidrófono.

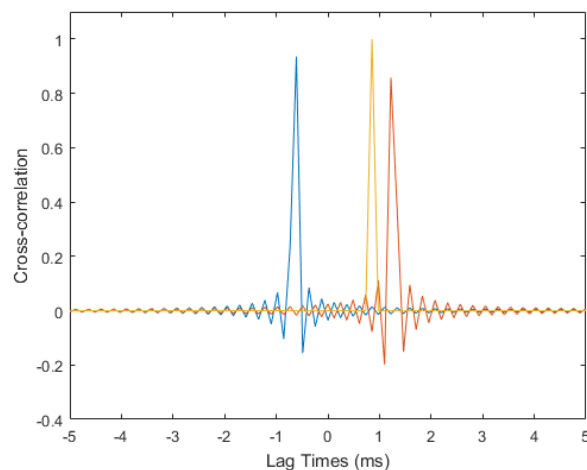


Figura 3.11: Correlación

### 3.6.3 Cálculo

Procederemos ahora a hacer el cálculo matemático del ángulo. Como conocemos todos los datos necesarios (propiedades del agua, distancia entre hidrófonos y retardo) es posible saber la dirección de incidencia entre dos hidrófonos.

Lo primero será conocer la velocidad de propagación del sonido en el agua. Como conocemos las propiedades del agua en el punto donde se hicieron las grabaciones, es posible hacer este cálculo con la ecuación 4:

- Temperatura: 27°C;
- Presión: 1Bar, se hizo prácticamente en la superficie;
- Salinidad: 0%, se hizo en agua con cloro, no salada;
- Velocidad de propagación a 0°C, 1Bar y 0% de salinidad: 1434.6 m/s;

$$V_s = 1434.6 + 2.5 * 27 + 0.18 * 1 + 1.4 * 0 = 1502.28 \text{ m/s}$$

La distancia entre hidrófonos también la conocemos, según los canales que comparemos, aplicaremos una distancia u otra:

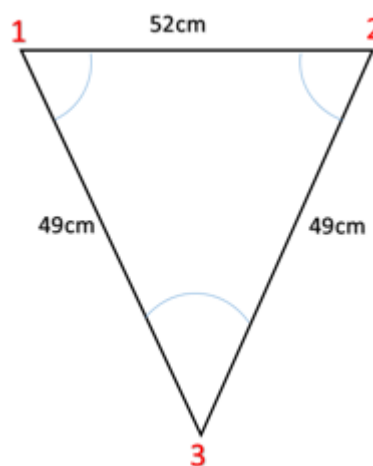
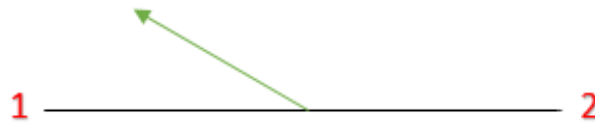


Figura 3.12: Distancia entre hidrófonos

Conociendo estos datos, aplicando la ecuación 5 sabremos el ángulo de incidencia entre los dos hidrófonos que comparemos:

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{Vs * Tau}{D} \right) (5);$$

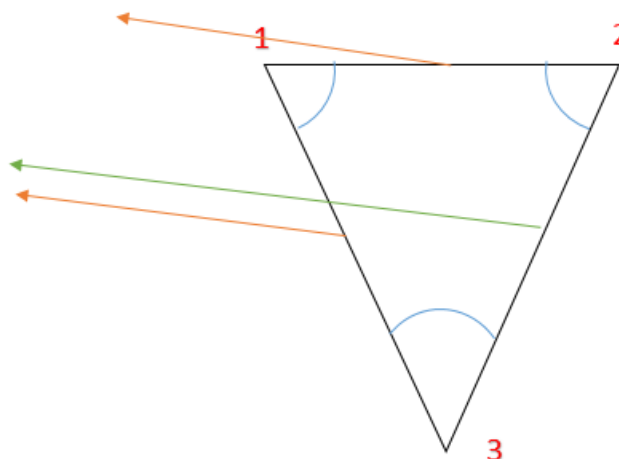


**Figura 3.13: Angulo de incidencia**

### 3.6.4 Angulo de incidencia

El proceso anterior se hará una vez por cada dos hidrófonos, lo que nos dará como resultado 3 ángulos de incidencia, pero habrá que hacer rotaciones en dos de ellos para poder deducir por donde viene el sonido, ya que con solo uno no somos capaces de saberlo.

Usaremos el proceso explicado en el apartado 2.3.9, según los ángulos que nos den los cálculos, aplicaremos una combinación de fórmulas mostradas en dicho apartado para deducir el ángulo de incidencia.



**Figura 3.14: Ángulo de incidencia**

## 4. CONCLUSIONES

### 4.1 Comentarios

Como se puede comprobar en los resultados de las pruebas, se verifica el correcto funcionamiento de los hidrófonos y que mediante el retardo entre ellos podemos verificar donde se encuentra la fuente de sonido.

En el caso de la depuradora, desde todos los puntos hemos sido capaces de averiguar donde se encuentra. Además siempre había una distancia entre 10 y 30m entre la depuradora y el array submarino, distancias similares a las profundidades en las que se realizan las inmersiones en buceo.

También se verifica el correcto funcionamiento con una alarma, ideal para poder encontrar a un compañero y no tener que anular la inmersión.



Como buceador, este proyecto ayudara a hacer las inmersiones más cómodas y seguras, y ayudaría a no tener que anularlas en caso de perder de vista a un compañero.

#### 4.2 Líneas Futuras

Este proyecto está enfocado a situaciones bajo el agua. Puede ser implementado en el equipo tradicional de buceo, ya que todo buceador lleva equipado un ordenador que muestra las propiedades del agua, por lo que puede calcular fácilmente la velocidad de propagación del sonido.

La posición escogida de los hidrófonos está pensada para poder ser implementada en el equipo de buceo, yendo dos hidrófonos a la altura de los hombros y otro en la parte baja de la espalda. Debido a la gran longitud de onda que tiene la señal de audio en el agua, la presencia de objetos entre hidrófonos no es ningún inconveniente, tal como se ha explicado en la memoria.

Con esto en mente, para que el funcionamiento del sistema sea correcto, el buceador se debe encontrar en posición horizontal, ya que en vertical, la función del tercer hidrófono no serviría, el sistema no sería capaz de saber si la fuente de sonido esta delante o detrás. Esto se podría solucionar añadiendo más hidrófonos al sistema.

A nivel militar, una ventaja que este sistema puede tener respecto al sonar es que no se envía ninguna señal, por lo que no se puede ser detectado. Como consecuencia, como un sonar usa ultrasonidos, este tiene mucho mayor alcance.

#### Bibliografía

- Juan Luis Cifuentes Lemus, Pilar Torres-García / Marcela Frías M. "Propagación del Sonido en el Agua". El Océano y Sus Recursos III. Las Ciencias del Mar: Oceanografía, Física, Matemática e Ingeniería. Capitulo V. Biblioteca Digital: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx>
- Matlab, Audición Espacial, Correlación, Transformada de Fourier, RMSE: UAH/Wikipedia.
- S. K, Mitra, "Diezmado" Digital Signal Processing. A computer-based approach.
- Experimentos Caseros: "Hidrófonos caseros". <http://www.experimentoscaseros.org/2012/09/como-hacer-un-hidrofono-casero.html>
- Ilustraciones de las páginas 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 31, 33, 34, 35, 45, 49 (fig. 3.79) y 52: selección y disposición de datos.